

# 含有 PFC 的 LED 驱动线路的改进设计

侯典立<sup>1,2</sup>, 张庆范<sup>1</sup>, 张龙<sup>2</sup>, 刘晓<sup>1</sup>

(1. 山东大学控制科学与工程学院, 济南 250061; 2. 鲁东大学电子与电气工程学院, 山东 烟台 264025)

**摘要:** LED 照明愈加得到世界各国的重视, 针对 LED 特性文中描述了其驱动方式, 分析和讨论了填谷式无源功率因数校正(Power Factor Correction, PFC)和反激拓扑的工作原理, 提出了一种新的改进填谷式功率因数校正线路, 并给出了仿真波形。针对高亮度 LED 照明的应用, 文章进一步阐述了更加适合于 LED 照明特性的反激线路及电流采样和反馈线路, 基于此原理设计了一款 LED 控制器产品, 系统长期运行稳定可靠。

**关键词:** 填谷式 PFC; LED; 反激; 恒流源

**中图分类号:** TM 344.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** CN12-1420(2011)02-0034-05

## 引言

随着 LED(Light-Emitting Diode)技术的发展, 大功率 LED(High-Power Light-Emitting Diode)照明在能源告急的今天得到世界各国的高度重视, LED 具有高效节能、无汞毒害、长寿命等优点。在所有用电设备中照明用电在发达国家达到 19%, 我国也达到了 10%, 而采用 LED 技术可以节电 50%以上, LED 控制器成为当前研究的热点。中小功率隔离式的 LED 驱动器基本采用填谷式无源 PFC、反激变换器的架构, 这种经典架构为多种产品采用, 也有多篇文献对填谷式 PFC 和反激线路进行了论述, 本文根据 LED 特性对此架构进行了描述, 同时在对其原理进行描述的基础上提出了一种新的改进填谷式功率因数校正线路, 针对高亮度 LED 照明的应用, 文章进一步阐述了更加适合于 LED 照明特性的反激线路及电流采样和反馈线路, 同时, 通过仿真对线路的改进及性能的改善进行了验证。

## 1 LED 驱动方式和方案

LED 电气特性与普通二极管类似, 具有正向导通、反向截止特性, 当 LED 两端所加正向电压超过导通电压时, 流过 LED 的电流急剧增加, 所以, LED 驱动采用电流源驱动更为合适和容易实现。电流源根据晶体管应用特性的不同可分为线性电流源和开关电流源, 线性电流源中晶体管或场效应管工作于放大状态, 特点是线路简单, 但功耗大, 而开关型电流源中晶体管或场效应管工作于截止区和饱和区, 故其效率较高, 但线路相对复杂。所以, 在极小功率、且线路要求简单的场合采用线性电流源, 本文针对中小功率 LED 照明应用采用开关型电流源。

开关电流源和开关电压源类似, 主要用于反馈调整脉宽所采集的信号不同, 电流源根据电流调整脉宽。针对 LED 照明应用, 对开关电流源的要求有其特殊性, 由于眼睛识别频率较低, 也可以说人眼对于光线的变化的高频具有滤波特性, 即使用于驱动 LED 为高频的方波非直流信号, 随着占空比变化人眼看到的 LED 是持续的亮度变化, 而不是高频的闪烁, 所以, 驱动 LED 可以用直流信号也可以用高频方波信号。正是如此, 调光既可以采用脉宽调制(PWM)方式, 也可以采用直流调整方式, 前者调光时色差变化小, 但光效低, 适合于对颜色变化要求高的场合, 如 LCD 电视背光; 后者相反<sup>[1]</sup>。二者在线路结构上主要是电流采样位置的不同, 通常前者采样电流取自开关管 MOSFET 导通时的电流, 后者电流取自滤波后直流输出点电流, 如图 2 中电阻  $R_s$ ,

收稿日期: 2010-10-18

基金项目: 鲁东大学校基金(L20082801)

作者简介: 侯典立(1975-)男, 讲师, 博士研究生, 主要从事电力电子及信号处理研究, hdianli@163.com。

张庆范(1949-)男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力电子与电力传动研究, zhangqf@sdu.edu.cn。

因此对于普通照明系统,采用直流调整较好。因为功率不是太大,系统架构采用填谷式无源 PFC、反激变换器的架构,如图 1 所示。

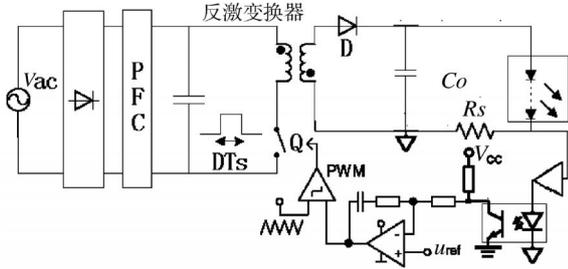


图 1 开关式 LED 驱动器系统图

## 2 填谷式 PFC 电路分析及改进

电源的功率因数校正这些年越得到各个国家和组织的重视,纷纷制定标准来限制用电设备对电网的污染,如国际标准 IEC61000-3-2、欧洲标准 EN61000-3-2。功率因数校正主要是减少无功功率,增加有功功率在功率中的比重,使得电网电源吸收的电流最小,而且还减小了与配电、发电以及相关过程中的基本设备有关的损耗和成本。由于没有谐波,也减小了与使用相同电源供电的其他器件之间的干扰。而传统的整流加电容滤波的线路,功

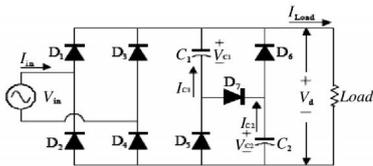


图 2 (a) 填谷式 PFC 线路

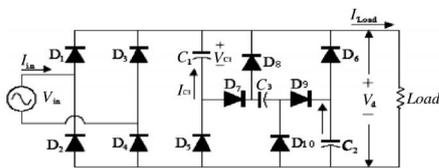


图 2 (b) 增强填谷式 PFC 线路

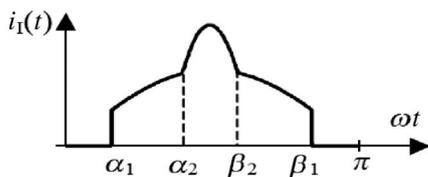


图 2 (c) 电源端输入电流波形图

率因数极低,约为 0.6,谐波电流值很大,3 次谐波达 70%~80%(以基波为 100%),总谐波失真 (THD) 达 120% 以上。因此,需要功率因数校正电路对离电源的输入电流波形进行整形,以使从电源吸取的有功功率最大化<sup>[2]</sup>。

功率因数校正电路有两大类,一类是无源 PFC 线路,另一类则为有源 PFC 线路。有源功率因数校正线路是把开关模式升压转换器置于输入整流器和储能电容之间,电路能对输入电流进行整形,以匹配输入电压的波形。有源 PFC 线路可以产生较高的功率因数,但线路复杂,主要用于功率较大的系统中。无源 PFC 线路相对较简单,功耗低,无源填谷式 PFC 线路是一种典型的无源 PFC 线路,如图 2(a) 所示<sup>[4]</sup>,有三个二极管,  $D_5 \sim D_7$  和两个电容  $C_1, C_2$  组成,电源输入电流波形如图 2(c) 所示。假定  $C_1=C_2=C$ , 线路工作于三种模式,

(1) 模式 1:  $\alpha_1 \sim \alpha_2$  和  $\beta_2 \sim \beta_1$ , 此时,  $U_{cmin} < u_{in} < 2U_{cmin}$ , 其中  $\beta_1 = 180^\circ - \arcsin \frac{1}{2} = 150^\circ, \beta_2 = 90^\circ, U_{cmin} = \sqrt{2}U_{in} \times \sin \alpha_1 = \frac{\sqrt{2}U_{in} \sin \alpha_2}{2}$  为电容  $C_1, C_2$  放电后的最小电压值,也意味着  $\sin \alpha_2 = 2 \sin \alpha_1$ , 二极管  $D_1, D_4$  或  $D_2, D_3$  导通,其他二极管处于截止状态,电源通过整流桥给负载供电。此时电源输出电流与电压相位差为零,电流为:

$$i_{in} = \sqrt{2}U_{in} \sin(\omega t) / R_{load} \quad (1)$$

(2) 模式 2:  $\alpha_2 \sim \beta_2$ , 此时,  $2U_{cmin} < u_{in}$ , 电源通过整流桥给负载供电,同时给电容  $C_1$  和  $C_2$  充电,二极管  $D_1, D_4$  或  $D_2, D_3$  以及  $D_7$  导通,其他二极管处于截止状态,此时电源输出电流为负载供电电流和电容充电电流之和为:

$$i_{in} = \frac{\sqrt{2}U_{in} \sin(\omega t)}{R_{load}} + \frac{u_{in} - 2U_{cmin}}{R_s - j2/\omega c} = \frac{\sqrt{2}U_{in} \sin(\omega t)}{R_{load}} + \frac{\sqrt{2}U_{in} \sin(\omega t) - \sqrt{2}U_{in} \sin(\alpha_2)}{R_s - j2/\omega c}$$

$$\text{即 } i_{in} = \sqrt{2}U_{in} \sin(\omega t) / R_{load} + \frac{\sqrt{2}U_{in} \sin(\omega t + \theta)}{Z_{RC}} - \frac{\sqrt{2}U_{in} \sin(\alpha_2 + \theta)}{Z_{RC}} \quad (2)$$

其中  $Z_{RC} = \sqrt{R_s^2 + 4/\omega^2 c^2}$ ;  $\theta = \arctan(2/\omega R_s C)$ ;  $R_s$  为二极管  $D_7$  导通电阻,等式(2)右边第一项与电压

相位差为零,不会有无功功率,第二项与电压相位角为  $\theta$ ,因为  $\alpha_2, \theta$  为常量,所以第三项为直流量,通常通过在二极管  $D_7$  串联电阻增大  $R_s$ , 进一步增大  $Z_{RC}$ 、减小  $\theta$ ,限制电容充电电流太大过冲。

(3) 模式 3:  $0 \sim \alpha_1$  和  $\beta_1 \sim \pi, u_{in} < U_{mm}/\sqrt{2}$ , 二极管  $D_1, D_2, D_3, D_4$  和  $D_7$  截止,  $D_5, D_6$  导通, 电源不再供电, 两个电容并联为负载提供电流, 假定电容足够大,  $\alpha_1 \approx 30^\circ, \alpha_2$  接近  $90^\circ$ 。则

$$2 * \frac{1}{2} C \left( \frac{\sqrt{2}}{2} U_{in} \right)^2 = \frac{120}{360} P_{out} T \quad \text{即} \quad C = \frac{2 P_{out} T}{3 U_{in}^2} \quad (3)$$

式中  $T$  为电源周期, 根据式(3)和设计要求选择合适的电容。

从以上分析可以看出, 增加功率因数主要从两个方面: 一方面, 根据(2)式, 通过增大  $R_s$  减小角度  $\theta$ , 减小电源电流与电压夹角, 可以增大功率因数, 但影响比较小, 并且牺牲了电源效率; 另一方面, 减小  $\alpha_1$  或增大  $\beta_1$ , 使得电流更接近于正弦波形, 如此也进一步减小谐波。文献[3]提到滤波电容不可以太大, 否则功率因素降低, 减小电容增大了放电时电容两端电压的变化, 减小了  $U_{mm}$ , 减小了  $\alpha_1, \alpha_2$  角度值, 但并不能改变  $\beta_1$ , 图 3(b) 增强填谷式 PFC 线路减小  $\alpha_1$  和增大  $\beta_1$ , 进一步改善功率因数, 且可以允许放电时 PFC 中滤波电容两端电压变化较小。

增强填谷式 PFC 线路在原来的基础上增加了一级电容充放电线路, 增加了二极管  $D_8, D_9, D_{10}$  和电容  $C_3$ , 原理与普通填谷式 PFC 相似, 当电源电压值大于电容放电后电压最小值时整流桥导通为负载供电; 当电源电压值大于电容放电后电压最小值的三倍时, 除给负载供电外, 二极管  $D_7, D_9$  导通为电容  $C_1, C_2$  和  $C_3$  充电; 当电源电压值小于电源幅值的三分之一时, 整流二极管截止, 电容  $C_1, C_2$  和  $C_3$  分别通过二极管  $D_5$  和  $D_8, D_{10}$  以及  $D_6$  放电。此时, 假定电容足够大,  $\alpha_1 \approx 19.47^\circ, \beta_1 \approx 180^\circ - 19.47^\circ = 160.53^\circ$ 。此时所需电容容值:

$$3 * \frac{1}{2} C \left( \frac{\sqrt{2}}{3} U_{in} \right)^2 = \frac{80}{360} P_{out} T \quad \text{即} \quad C = \frac{2 P_{out} T}{3 U_{in}^2} \quad (4)$$

### 3 LED 驱动的反激拓扑分析及改进

开关型恒流源拓扑结构和开关型恒压源拓扑

结构基本相同, 传统的拓扑结构也可以用于恒流源, 并且各种拓扑结构的特点同样适用于恒流源, 因此, 用于 LED 照明的小功率隔离电源采用反激拓扑比较合适, 反激拓扑线路相对简单, 且滤波性能好。

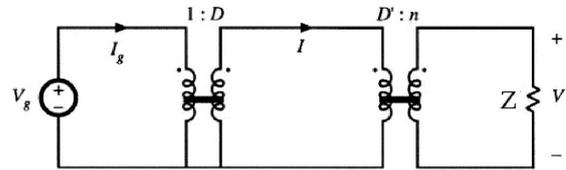


图 3 反激拓扑在连续模式下的等效线路图

典型的反激拓扑如图 1 所示, 反激拓扑是由非隔离式拓扑 BUCK-BOOST 演变而来, BUCK-BOOST 的电感演变为变压器<sup>[6]</sup>, 因此, 由于变压器的加入使反激拓扑电压变化范围增大, 之所以称之为反激就是因为变压器原边和次边电流并不同时流过, 开关管导通时, 变压器原边存储能量, 次边二极管  $D$  截止, 电容  $C_o$  为负载供电; 开关管截止时, 变压器线圈电压反向, 二极管  $D$  导通, 变压器释放能量, 为滤波电容  $C_o$  和负载  $Z$  供电, 反激拓扑在连续模式下的等效线路图如图 3 所示。电压转换比为:

$$M(D) = \frac{V}{V_g} = n \frac{D}{D'} \quad (5)$$

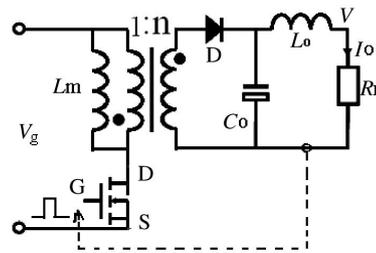


图 4 反激拓扑结构

作为恒压源输出滤波电容并联在负载两端, 因此并不会出现电压的突变, 但用于恒流源如果拓扑结构不变, 只是改用采集电流信号与参考信号比较后经放大、调制后生成方波驱动开关管, 从结构上并不能保证电流不会突变, 尤其是负载为高亮度 LED。由于负载 LED 的非线性特性, 导通后施加到 LED 的正向电压微小变化会带来 LED 正向电流急剧变化, 也意味着电流的变化对电压的变化进行了高度放大, 所以即使输出电压的小的纹波或过冲都

有可能引起 LED 的不正常工作,并且发光二极管的正向电流和电压之间存在明显的非线性关系,干扰信号会造成电流的过冲、甚至系统的不稳定,为解决此问题应在电容  $C_o$  和负载之间串联电感,改进后的反激拓扑如图 4 所示,充分利用电感电流不能突变的特性,避免 LED 电流的突变,同时对纹波和噪声起到一定的过滤作用,加强了系统稳定性。由于电感  $L_o$  只是对电流突变和纹波起作用,而稳态时电感两端的压差为 0, 所以把  $V=IR_L$  带入等式(5), 整理可得:

$$I = \frac{nV_g D}{R_L D'} \quad (6)$$

### 4 电流采样反馈线路

电流信号采样通常转化为电压信号,大电流采用电流互感器或分流器,而对于 LED 电流相对较小, 电流的采样可以采用直接串联电阻的方式,电流采样线路如图 5 所示, 电阻  $R_s$  采集电流信号,并

把电流信号转换为电压信号, 采样电阻的阻值由 LED 电流和晶体管基极对发射极的导通电压决定, 在此电阻  $R_s$  两端的电压经过晶体管放大驱动光耦, 从而把输出电流的大小经光耦反馈给控制芯片, 进一步控制电流输出。

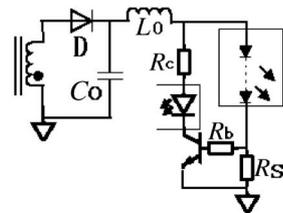


图 5 电流采样线路

### 5 仿真实验

本文利用 orCAD16.2 软件对上述理论进行了仿真,PFC 线路、输入电压幅值为 310 V, 负载电阻为 200  $\Omega$ , 二极管采用 1N4007, PFC 滤波电容  $C=20 \mu\text{F}$ , 且在二极管 D7 串联 10  $\Omega$  电阻来抑制电流过

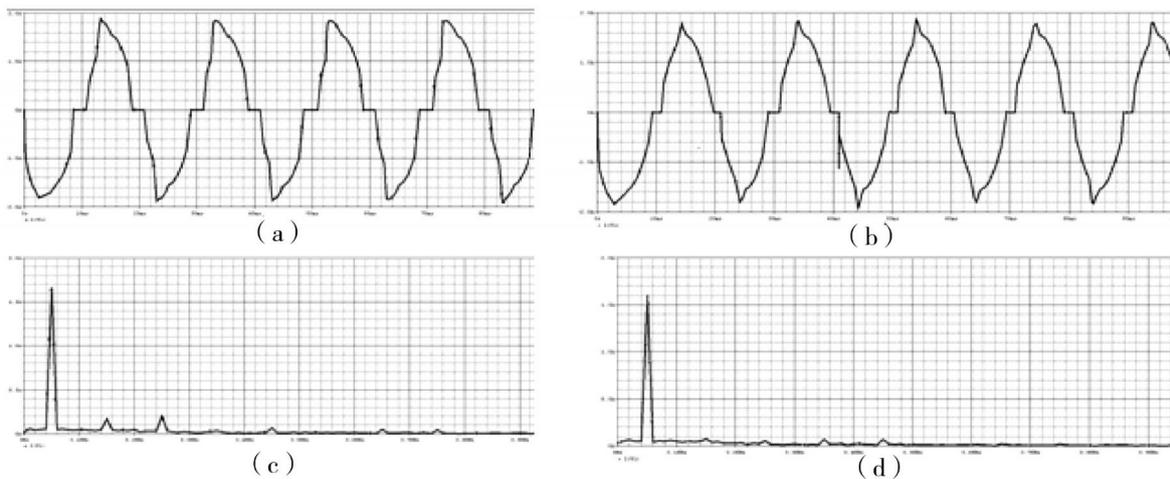


图 6 (a)填谷式 PFC 线路电源端电流波形  
(c) 填谷式电源端电流波形 FFT 分析

(b)增强填谷式 PFC 线路电源端电流波形  
(d) 增强填谷式电源端电流波形 FFT 分析

冲,电源电流测试波形和傅里叶变换分析如图 6 所示。增强填谷式 PFC 线路减小  $\alpha_1$  和增大  $\beta_1$ , 进一步改善功率因数,同时减小了 3 次和 5 次谐波。

### 6 结束语

本文针对 LED 照明, 描述了 LED 驱动器的控

制基本机理,并阐述了填谷式 PFC 线路和反激拓扑线路的原理及其改进,改进后的线路在性能上得到了很大提高。基于上述理论设计了一款基于脉宽调制(PWM)芯片 CR6848 的 32 W 的 LED 控制器,输出电流 350 mA, 偏差为小于 2%, 功率因数达到 0.92,效率达到 90%。该控制器已经应用于 LED 照明的产品中,系统长期运行稳定可靠。

**参考文献:**

- [1] Georg Sauerl?nder, Dirk Hente, Harald Radermacher. Driver Electronics for LEDs [C]. Industry Applications Industry Applications conference, 2006, (5): 2621 - 2626.
- [2] 安森美半导体有限公司.功率因数校正(PFC)手册[R]. www.onsemi.com, 2004,8.
- [3] 蒋孝平,梁 慧.填谷式无源 PFC 在离线 LED 照明[J]. 灯与照明,2009,33(3).
- [4] Cristian Farcas, Dorin Petreus, Emil Simion1, et al. A Novel Topology Based on Forward Converter with Passive Power Factor Correction [C]. Electronics Technology, ISSE '06. 29th International Spring Seminar on. 2006 , Page(s): 268 - 272.
- [5] Costa M A D, do Prado R N, Campos A, et al. An analysis about valley fill filters applied to electronic ballasts[C]. Industrial Electronics Society, 2003. IECON '03. The 29th Annual Conference of the IEEE. 2004, (4):509 - 514.
- [6] Robert W Erickson,Dragan Maksimovie. Fundamental of Power Electronics [M]. second edition, Kluwer Academic Publisher, 2004,209-218.

## Improvement and Design of a LED Driver with PFC

HOU Dian-li<sup>1,2</sup>, ZHANG Qing-fan<sup>1</sup>, ZHANG Long<sup>2</sup>, LIU Xiao<sup>1</sup>

(1. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan Shandong 250061, China; 2. School of Electronic and Electrical Engineering, Ludong University, Yantai Shandong 264025, China)

**Abstract:** LED lighting has been more and more important in the world, LED driver has been described according to the character of LED. The principle of valley-filled PFC and flyback circuit has been analyzed and discussed. A novel and improved valley-filled PFC circuit is proposed with simulation result. For the application of high lightness LED, the flyback and current-sensing and feedback circuits more suitable for LED lighting have been further studied. A LED driver has been designed according to the theory and works well and stably for a long time.

**Key words:** valley-filled PFC; LED; flyback; constant current source